

大型回转体质量参数精密检测研究^{*}

杨铭¹, 季馨²

(1. 南京工程学院, 南京, 210013; 2. 东南大学, 南京, 210096)

[摘要] 阐述了基于周期测量的无质量传感器的动态检测方法, 可以精确地测量出大型回转体的质量等参数, 为将其应用到工程实际领域提供了理论和实践依据.

[关键词] 周期; 转动台; 测试系统; 质量参数

[中图分类号] TH113.2⁺1; [文献标识码] A; [文章编号] 1008- 1925(2001)04- 0070- 04

国民经济的各个领域都离不开测试技术. 高精度测试系统的设计和研究, 在航空航天、军事和国民经济等领域中具有重要的意义. 对于大型回转体质量参数的精密检测, 无论是测试技术较先进的德国、俄罗斯等国家的测试方案, 还是国内自行设计生产的测试系统, 均采用静态测量法. 但采用传统的静态测量方法, 需要使用多个测量精度在万分之一、量程大于 500 kg、总价值在数十万元以上的质量传感器. 高精度、大量程的质量传感器不仅国内规格很少, 而且价格昂贵. 本文阐述了无质量传感器的精密检测质量的方法. 该方法是一种基于廉价的、高精度的长度计量和周期测量的动态检测方法, 它不仅可以精确地测量出大型回转体的质量参数, 还可以检测偏心量、转动惯量等参数. 本文为把这种测试方法应用到工程实际领域提供了理论和实践依据.

1 测试系统的测量原理

笔者采用的测试系统转动台的模型, 如图 1^[1] 所示.

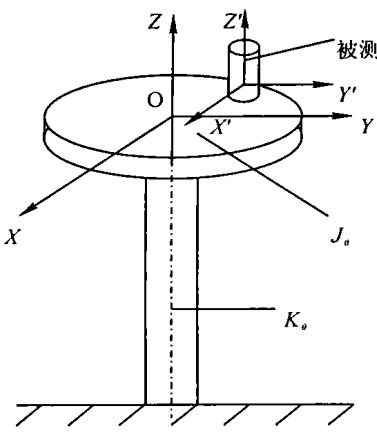


图 1 转动台模型简图

设扭振系统的刚度为 K_{θ} , 转动惯量为 J_{θ} , 角位移为 θ , 角加速度为 $\ddot{\theta}$. 由振动理论^[2] 可得无阻尼扭转振动的运动微分方程为:

$$J_{\theta} \ddot{\theta} + K_{\theta} \theta = 0 \tag{1}$$

其无阻尼固有角频率为 $\omega_{\theta} = \sqrt{K_{\theta} / J_{\theta}}$

$$\text{则 } J_{\theta} = K_{\theta} / \omega_{\theta}^2 = K_{\theta} T^2 / 4\pi^2 \tag{2}$$

式中: T 为无阻尼扭转振动周期.

被测物体由夹具固定在能够转动的测试机构上随转动台一起转动. 由式(2) 可得:

$$T = 2\pi \sqrt{J / K_{\theta}} = 2\pi / \omega_{\theta} \tag{3}$$

式中: J 为被测物体和转动台总的转动惯量.

^{*} 收稿日期: 2001- 07- 02

作者简介: 杨铭, 1962- , 女, 南京工程学院讲师, 主要从事机械制造、机械电子工程的教学与研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

转动台和被测物体的位置关系如图 2 所示, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 为被测物体在转动台的四个位置, 图中被测物体在 Q_3 位置。

根据被测物体在转动台上的位置, 可以得到式 (3) 中的总转动惯量为:

$$J = J_{\text{台}} + J_z + M[(X + E_x)^2 + (Y + E_y)^2] \quad (4)$$

式中: $J_{\text{台}}$ 为空载时测试转动台和夹具的转动惯量; J_z 为被测物体绕 Z 轴(见图 1)的转动惯量; M 为被测物体的质量; E_x 、 E_y 为被测物体在 X 、 Y 方向上的偏心量; X 、 Y 为被测物体在转动台上的位置所对应的坐标。由此可将公式 (3) 化为:

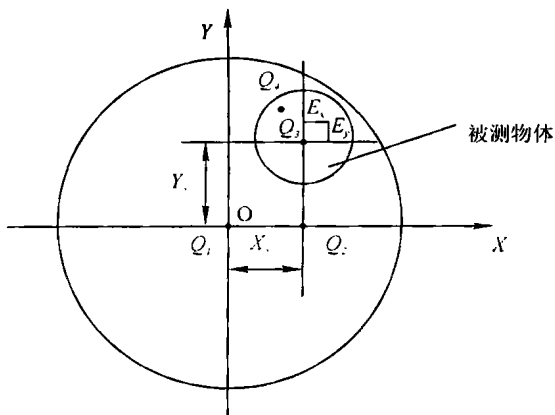


图 2 被测物体位置示意图

$$T = 2\pi \sqrt{J_{\text{台}} + J_z + M[(E_x + X)^2 + (E_y + Y)^2]} / K_{\theta} \quad (5)$$

为使被测物体在转动台上处于不同位置时 E_x 和 E_y 保持不变, 可以将被测物体用夹具固定在矩形滑块上, 沿转动台上的矩形槽平移到不同位置。此时 J 会发生变化, 从而得到不同的周期。当被测物体在转动台上移动四次时, 由式 (5) 可得如下方程组:

$$\begin{cases} T_1 = 2\pi \sqrt{J_{\text{台}1} + J_z + M[(E_x + X_1)^2 + (E_y + Y_1)^2]} / K_{\theta} \\ T_2 = 2\pi \sqrt{J_{\text{台}2} + J_z + M[(E_x + X_2)^2 + (E_y + Y_2)^2]} / K_{\theta} \\ T_3 = 2\pi \sqrt{J_{\text{台}3} + J_z + M[(E_x + X_3)^2 + (E_y + Y_3)^2]} / K_{\theta} \\ T_4 = 2\pi \sqrt{J_{\text{台}4} + J_z + M[(E_x + X_4)^2 + (E_y + Y_4)^2]} / K_{\theta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $(X_i, Y_i) (i = 1, \dots, 4)$ 分别为被测物体在转动台上不同位置所对应的坐标; $J_{\text{台}i} (i = 1, \dots, 4)$ 分别为转动台空载时, 移动夹具滑块至上述位置时测得的转动惯量; $T_i (i = 1, \dots, 4)$ 分别为相应的周期。

由方程组式 (6), 可以获得被测物体的 M 、 E_x 、 E_y 、 J_z 等参数。被测物体在转动台上移动多于四次时, 得到方程组后可利用最小二乘法来求解各个参数。若改变转轴方向, 还可以获得转动惯量 J_x 、 J_y 和 Z 方向上的偏心量 E_z 。

由于设计、制造和加工等原因, 使测试系统的转动台在转动时阻尼比较大, 导致了转动时试验台往复扭振次数较少, 给周期测量精度带来了一定影响。因此, 我们给转动台施加一外激励, 以减少阻尼对测量精度的影响。

利用激励设备(激振器)对转动台施加一个余弦周期力矩, 使转动台强迫振动, 其运动微分方程为:

$$J\ddot{\theta} + C_{\theta}\dot{\theta} + K_{\theta}\theta = M_0\cos\omega t \quad (7)$$

式中: C_{θ} 为阻力系数, $\dot{\theta}$ 为角速度, M_0 为力矩振幅, ω 为激励角频率, t 为时间。

令 $M_0 = K_{\theta}A_{\theta}$, A_{θ} 为当量静变形, 再令强迫振动的稳态解为 $\theta = A_{\theta}\cos(\omega t - \varphi)$, A_{θ} 为角振动振幅, 将稳态解代入式 (7), 经计算得:

$$A_{\theta} = A_{\theta} / \sqrt{(1 - r^2)^2 + 4D^2r^2} \quad (8)$$

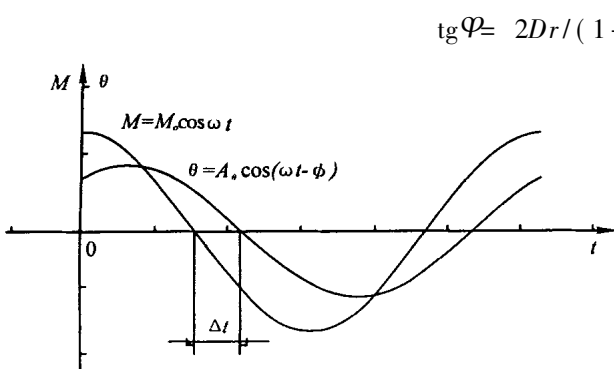


图3 外加激励的稳态扭振曲线

$$\operatorname{tg} \varphi = 2Dr / (1 - r^2) \quad (9)$$

式中: $r = \omega / \omega_0$, 称为频率比; $D = \alpha / \omega_0$, 称为阻尼比; $\alpha = C\theta / 2J$, 称为阻尼系数. φ 为相位角, 可由试验测得, 具体方法为: 测出稳态扭振曲线 $\theta = A_0 \cos(\omega t - \varphi)$, 并由激励源获得激励输出信号 $M = M_0 \cos \omega t$, 如图3所示, 由此得到 Δt , 则 $\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T}$. 将 $r = \omega / \omega_0$ 代入式(9) 中得:

$$\operatorname{tg} \varphi \omega_0^2 - 2\omega D \omega_0 - \operatorname{tg} \varphi \omega^2 = 0 \quad (10)$$

如果在 ω_1, ω_2 两个激振频率下, 用上

述方法测得 φ_1, φ_2 两个相位角, 并使转动台达到稳态扭振, 则可以得到一个二元方程组:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \varphi_1 \omega_1^2 - 2\omega_1 D \omega_0 - \operatorname{tg} \varphi_1 \omega_1^2 = 0 \\ \operatorname{tg} \varphi_2 \omega_2^2 - 2\omega_2 D \omega_0 - \operatorname{tg} \varphi_2 \omega_2^2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

通过解方程组可以求出阻尼比 D 和系统无阻尼固有角频率 ω_0 , 根据式(3) 由 ω_0 可得 T . 当四次改变被测物体位置时, 根据式(6) 可以列出一个四元方程组, 则可计算出质量 M 等参数.

2 测试系统的误差分析

根据测量原理可知, 测试系统的测试精度与试验转动台和周期测量系统的设计有关. 由式(6) 可得下式:

$$\begin{cases} M = f_1(T_1, T_2, T_3, T_4) \\ E_x = f_2(T_1, T_2, T_3, T_4) \\ E_y = f_3(T_1, T_2, T_3, T_4) \\ J_z = f_4(T_1, T_2, T_3, T_4) \end{cases} \quad (12)$$

由误差传递和分配理论^[3] 可得:

$$\Delta M = \frac{\partial f_1}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial f_1}{\partial T_2} \Delta T_2 + \frac{\partial f_1}{\partial T_3} \Delta T_3 + \frac{\partial f_1}{\partial T_4} \Delta T_4 \quad (13)$$

式中 $\frac{\partial f_1}{\partial T_1}, \frac{\partial f_1}{\partial T_2}, \frac{\partial f_1}{\partial T_3}, \frac{\partial f_1}{\partial T_4}$ 分别为测量质量 M 时的各个直接测量值 T_1, T_2, T_3, T_4 的误差传递系数, $\Delta M, \Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4$ 分别为质量和周期的测量误差.

同理也可求得偏心量测量误差 $\Delta E_x, \Delta E_y$ 和转动惯量测量误差 ΔJ_z .

对本测试系统的误差分析, 可以从影响周期测量精度的因素入手. 由式(2) 和(5) 可得:

$$J\theta = K\theta T^2 / 4\pi^2 = J_{\text{台}} + J_z + M[(E_x + X)^2 + (E_y + Y)^2] \quad (14)$$

根据误差传递公式^[3] 得:

$$\begin{aligned} \Delta J\theta &= \frac{\partial}{\partial J_{\text{台}}} \Delta J_{\text{台}} + \frac{\partial}{\partial J_z} \Delta J_z + \frac{\partial}{\partial M} \Delta M + \frac{\partial}{\partial E_x} \Delta E_x + \frac{\partial}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial}{\partial E_y} \Delta E_y + \frac{\partial}{\partial Y} \Delta Y \\ &= \Delta J_{\text{台}} + \Delta J_z + [(E_x + X)^2 + (E_y + Y)^2] \Delta M + 2M(E_x + X) \Delta E_x + \\ &\quad 2M(E_x + X) \Delta X + 2M(E_y + Y) \Delta E_y + 2M(E_y + Y) \Delta Y \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\Delta J\theta$ 为 $J\theta$ 的测量误差, $\Delta J_{\text{台}}$ 为 $J_{\text{台}}$ 的测量误差, $\Delta X, \Delta Y$ 为长度测量误差, 其中 $\Delta J_{\text{台}}, \Delta J_z$ 在设计时已经标定.

当本测试系统采用采样频率为40 kHz 的采样板时,其周期测量精度为 5×10^{-5} s; 选择长度计量精度为 5×10^{-5} m (0.05 mm). 当被测物体在 (0.000, 0.000)、(0.000, 0.200)、(0.200, 0.200)、(0.100, 0.300) 位置时,测得周期分别为1.686 s、2.131 s、2.494 s、2.651 s. 根据式(6) 可以计算出 M 、 E_x 、 E_y 、 J_z . 由被测物体的四个位置,根据式(15) 可以列出一个未知量为 ΔM 、 ΔE_x 、 ΔE_y 和 ΔJ_z 的四元方程组,就可以求出 ΔM 等参数.

计算结果表明,利用本检测方法获得的质量 M ,其相对误差 $\Delta M/M$ 控制在 2.5×10^{-5} 量级范围之内,满足检测精度为 10^{-4} 的要求.如将长度计量精度和采样频率提高,就可以获得更高的检测精度.

3 结束语

本检测方法是采用一种基于周期测量的无质量传感器的动态测量方法,它和传统的测量方法相比有以下主要特点:

- (1) 测试原理简单、易懂.
- (2) 各个参数是通过解非线性方程组获得,而非线性方程组又是依赖于不同的周期得到.
- (3) 机构简单,省去了常规的价格昂贵的高精度质量传感器.设备易于操作和维护,误差控制和分析较容易,保证了测试精度.

该研究为工程中庞大回转体的参数检测系统的设计提供了理论和实践依据.在国民经济的各个领域,尤其是航空航天和军事等领域中,具有重要的实际意义和应用价值.

[参考文献]

- [1] 张有平.大型回转体运动参数精密检测 CAT 技术的研究[D]:[学位论文].南京:东南大学,2001
- [2] 季馨.电子设备振动分析与试验[M].南京:东南大学出版社,1992
- [3] 刘金环.工程测试技术[M].北京:兵器工业出版社,1998

Research on Accurate Test of Mass Parameter of the Large-scale Revolved Object

Yang Ming¹, Ji Xin²

(1. Nanjing Engineering College, Nanjing, 210013, PRC; 2. Southeast University, Nanjing, 210096, PRC)

Abstract: This paper presents dynamic test without mass transducer based on period measurement. The test may accurately measure the mass parameters etc of large-scale revolved object, and provides the theoretical and practical basis for engineering practice.

Key words: Period, Rotational Equipment, Measurement System, Mass Parameter

[责任编辑:刘健]